



УДК 551.578.46:528.946(477.87)
DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.16.2026.10>

ПРОСТОРОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЛАВИННОЇ НЕБЕЗПЕКИ БОРЖАВСЬКОГО ГІРСЬКОГО МАСИВУ ЗАСОБАМИ QGIS

В. В. Маєвський¹, Д. І. Холявчук², С. М. Кирилюк³, Я. А. Поп'юк⁴, І. П. Добинда⁵

Снігові лавини є одним із провідних небезпечних природних процесів у Карпатах, що становлять реальну загрозу для туристичної діяльності, транспортної інфраструктури та безпеки людей на гірських схилах. Значні абсолютні висоти, розвинена мережа відкритих полонин і активне туристичне використання у зимовий сезон визначає необхідність детального лавинного районування території Боржавського гірського масиву. Метою дослідження є комплексна оцінка та просторове моделювання лавинної небезпеки Боржавського гірського масиву шляхом інтеграції морфометричних параметрів рельєфу та характеристик підстильної поверхні засобами геоінформаційних технологій.

У дослідженні використано цифрові моделі рельєфу SRTM та ASTER GDEM з просторовою роздільною здатністю 30 м/піксель, а також мультиспектральні супутникові знімки Landsat 8/9.

¹ студент кафедри фізичної географії, геоморфології та палеогеографії
(Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, м. Чернівці)
e-mail: maievskiy.vladyslav@chnu.edu.ua
ORCID: 0009-0001-8371-8186

² доктор географічних наук,
доцент кафедри фізичної географії, геоморфології та палеогеографії
(Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, м. Чернівці)
e-mail: d.kholyavchuk@chnu.edu.ua
ORCID: 0000-0002-7489-7848

³ кандидат географічних наук,
доцент кафедри фізичної географії, геоморфології та палеогеографії
(Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, м. Чернівці)
e-mail: s.kyrylyuk@chnu.edu.ua
ORCID: 0000-0002-2532-404X

⁴ кандидат географічних наук,
асистент кафедри фізичної географії, геоморфології та палеогеографії
(Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, м. Чернівці;
Інститут географії Національної академії наук України, м. Київ)
e-mail: y.poriuk@chnu.edu.ua
ORCID: 0000-0003-2230-0365

⁵ кандидат географічних наук,
доцент кафедри фізичної географії, геоморфології та палеогеографії
(Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, м. Чернівці)
e-mail: i.dobynda@chnu.edu.ua
ORCID: 0000-0001-5242-7637

Опрацювання даних виконано в середовищі QGIS 3.x із застосуванням модулів GDAL/Processing і SAGA. Проаналізовано п'ять ключових морфометричних факторів лавиноутворення: абсолютну висоту, крутизну схилів, їх експозицію, планову та профільну кривизну поверхні. Тип підстильної поверхні класифіковано за алгоритмом ISO Cluster Unsupervised Classification (QGIS/GDAL) на основі знімків Landsat з допомогою плагіна Spatial Analysis Toolbox. Кожному класу кожного фактора присвоєно зважений коефіцієнт лавинної небезпеки (від 0 до 3). Інтегральний індекс ризику розраховано за мультиплікативною формулою, яка враховує адитивний внесок морфометричних параметрів і підсилювальну роль крутизни та шорсткості поверхні.

Встановлено, що найвищий рівень лавинної небезпеки притаманний пригребневим ділянкам масиву на висотах понад 1 400 м, де поєднуються крутизна схилів 30–45°, південна експозиція та відсутність лісового покриву. Зони високої лавинної небезпеки займають близько 15 км², або 4 % загальної площі масиву Боржава, тоді як безпечні та малонебезпечні території становлять понад 80 %. Лісові масиви виступають ключовим природним стабілізатором снігового покриву, суттєво знижуючи ризик у нижніх частинах схилів.

Результати узгоджуються з дендрохронологічними реконструкціями лавинної активності у суміжних масивах Східних Карпат і підтверджують ефективність ГІС-моделювання для попереднього лавинного районування середньогірських територій Українських Карпат. Отримані карти можуть слугувати науковою основою для коригування туристичних маршрутів, обмеження доступу до небезпечних зон у зимовий сезон та обґрунтування заходів інженерного захисту.

Ключові слова: снігові лавини, лавинна небезпека, ГІС-моделювання, морфометрія рельєфу, Боржавський хребет, Українські Карпати, геопросторовий аналіз.

SPATIAL MODELLING OF AVALANCHE HAZARD IN THE BORZHAVA MOUNTAIN MASSIF USING QGIS TOOLS

V. V. Maievskyi, D. I. Kholiavchuk, S. M. Kyrlyuk, Y. A. Popiuk, I. P. Dobynda

Snow avalanches represent one of the most significant natural geomorphological hazards in the Carpathians, posing a direct threat to tourism, transport infrastructure and human safety on mountain slopes. The Borzhava mountain massif, a popular recreational area in Zakarpattia Oblast, is characterised by considerable elevation, extensive open subalpine meadows (polonyny), and intense winter tourism, all of which necessitate detailed avalanche hazard zonation.

The study aims to assess comprehensively and spatially model avalanche hazard across the Borzhava massif by integrating morphometric relief parameters and land cover characteristics using GIS technologies.

Digital elevation models SRTM and ASTER GDEM (30 m resolution) and multispectral Landsat 8/9 satellite imagery were used as primary data sources. All processing was performed in QGIS 3.x using the GDAL/Processing module and SAGA module. Five key morphometric factors influencing avalanche formation were analysed: absolute altitude, slope steepness, aspect, plan curvature, and profile curvature. Land cover type was classified using the ISO Cluster Unsupervised Classification algorithm (QGIS/GDAL) from Landsat imagery using the Spatial Analysis Toolbox plugin. Each class of each factor was assigned a weighted avalanche hazard coefficient (0–3). An integrated risk index was computed using a multiplicative formula that accounts for the additive contribution of morphometric parameters and the amplifying role of slope steepness and surface roughness. The highest avalanche hazard is concentrated in the ridge-crest zone above 1,400 m a.s.l., where steep slopes of 30–45°, southern aspects, and absence of forest cover coincide. High-hazard zones cover approximately 15 km² (4 % of the massif area), while safe and low-hazard territories account for over 80 %. Forest stands act as a key natural stabiliser of snow cover, substantially reducing risk on lower slopes.

The results are consistent with dendrochronological reconstructions of avalanche activity in adjacent Eastern Carpathian massifs and confirm the effectiveness of GIS-based modelling for preliminary avalanche zonation in the mid-mountain terrain of the Ukrainian Carpathians. The produced maps can serve as a scientific basis for adjusting tourist routes, restricting access to hazardous zones during winter, and justifying engineering protection measures.

Key words: snow avalanches, avalanche hazard, GIS modelling, relief morphometry, Borzhava Ridge, Ukrainian Carpathians, geospatial analysis.

Вступ

Снігові лавини є одним із найнебезпечніших геоморфологічних процесів у гірських регіонах світу, становлячи загрозу для життя людей, туристичної інфраструктури та господарських об'єктів. В Українських Карпатах лавинні процеси мають локальний, але потенційно небезпечний характер. Офіційно ідентифіковано понад 780 лавинних осередків, а за даними спостережень 1970–2009 рр. зафіксовано щонайменше 539 сходжень (Грищенко та ін., 2014). Боржавський хребет, один із найпопулярніших рекреаційних районів Закарпаття, належить до таких небезпечних ареалів. На його схилах виділено 36 постійних ділянок зародження лавин (Грищенко та ін., 2014).

Дослідження лавинних процесів пройшло шлях від описових кадастрових методів до складного геоінформаційного і дендрохронологічного моделювання. Зарубіжні дослідники – Д. МакКланг і П. Шерер, Б. Джеймисон і К. Стетем, М. Маджоні й У. Грубер заклали теоретичну основу розуміння ролі топографічних чинників у формуванні лавин (McClung & Schaerer, 1993; Jamieson & Stethem, 2002; Maggioni & Gruber, 2003). У Карпатському регіоні важливим є внесок І. Г. Гаврила та ін., які реконструювали хронологію лавинної активності у Роднянських горах (Східні Карпати, Румунія) методом дендрохронології, встановивши зв'язок між частотою сходжень і режимом снігонакопичення. Ця методика реалізована для Чорногірського масиву (Східні Карпати, Україна) (Gavrila et al., 2022; Decaulne et al., 2023a). Авторами розроблено комплексний підхід, що поєднує дендрохронологічну реконструкцію лавинної активності протягом останнього століття з аналізом синоптичних умов, і показано залежність частоти сходжень від циркуляційних типів атмосфери.

Попередньо встановлено, що морфометричні параметри рельєфу є провідними умовами просторового поширення лавин. Критична крутизна для сходження лавин у Карпатах зазвичай становить 30–45°, хоча зафіксовані сходження і на схилах із нахилом 15–18° (Біланюк і Тиханович, 2015; Rudyi et al., 2020). Південні експозиції є найактивнішими в періоди відлиги через інтенсивне радіаційне прогрівання та повторні цикли підтавання й перемерзання снігу. Опуклі форми рельєфу пригребеневих зон пов'язані з підвищеними напруженнями у сніговому покриві та підвищеною ймовір-

ністю ініціації лавинних процесів (Biskupic & Barca, 2010).

У попередніх дослідженнях також виявлено, що рослинний покрив і лісові екосистеми виконують функцію природного стабілізатора снігового покриву. Відсутність лісу на вершинних і пригребеневих ділянках, а також антропогенне зведення лісів через суцільні рубки та розширення пасовищ є ключовими передумовами формування потужних лавин у Карпатах. На масиві Боржава вододільна частина є лавинонебезпечною за будь-яких експозицій через значну розчленованість рельєфу (500–1 000 м) та переважання відкритих полонин (Грищенко та ін., 2014; Грицьків та ін., 2016).

Застосування ГІС-технологій і даних дистанційного зондування Землі відкрило новий етап у картографуванні лавинної небезпеки. М. Біскупіч та І. Барка розробили методіку просторового моделювання лавинних виносів, адаптовану для Карпатського регіону (Biskupic & Barca, 2010). А. Ковасніану та ін. продемонстрували ефективність 3D-ГІС-моделювання у національному парку Чехлау (румунські Карпати) (Covasniianu et al., 2011). В Україні Н. З. Грицьків та ін. виконали узагальнене картографування лавинонебезпечних територій Карпат засобами ГІС, проте без прив'язки до конкретного масиву та без розрахунку інтегрального індексу ризику (Грицьків та ін., 2016). М. Настюк та ін. розробили детальну факторно-індексну методіку для гірських районів Чернівецької області на основі QGIS Processing/GDAL, яка стала безпосередньою методологічною основою цього дослідження (Настюк та ін., 2023). М. Карабінюк та ін. застосували ГІС-аналіз для Чорногірського масиву, підтвердивши ефективність морфометричного підходу для карпатського середньогір'я (Karabiniuk et al., 2022).

Зміни клімату формують новий зміст лавинної небезпеки. Попри загальноєвропейські тенденції до зниження висоти снігового покриву, у високогір'ї Карпат спостерігається його підвищення взимку та на початку весни (Vyshnevskiy & Donich, 2021). Це сприяє формуванню «мокрих» лавин у вигляді адвекційних відлиг. І. Г. Гаврила та ін. на матеріалі Роднянських гір показали, що коливання лавинної активності корелюють зі змінами зональної циркуляції атмосфери та аномаліями снігонакопичення (Gavrila et al., 2022).

А. Декольн та ін. підтвердили це для Чорногори. Так, дендрохронологічний аналіз виявив багатодесятилітні цикли лавинної активності, які узгоджуються із динамікою домінантних синоптичних типів. Це є важливим контекстом для верифікації сучасних просторових моделей і прогнозування лавинної активності в умовах змін клімату (Decaulne et al., 2023a).

Зростання рекреаційного навантаження на Боржавський масив у поєднанні зі змінами режиму снігонакопичення зумовлює потребу в деталізованій оцінці лавинної небезпеки. Попри наявні регіональні дослідження (Грицьків та ін., 2016; Настюк та ін., 2023), комплексне просторове моделювання лавинного ризику безпосередньо для Боржавського масиву з використанням вільного програмного забезпечення QGIS та мультиплікативного факторного індексу досі не проводилось. Саме це визначає актуальність і наукову новизну пропонованого дослідження.

Метою дослідження є оцінювання та просторове моделювання лавинної небезпеки Боржавського гірського масиву на основі аналізу морфометричних параметрів рельєфу та характеристик підстильної поверхні з використанням геоінформаційних технологій.

Для досягнення поставленої мети було визначено комплекс взаємопов'язаних завдань, що передбачали послідовне виконання дослідження. Насамперед проаналізовано фізико-географічні та ландшафтні особливості Боржавського хребта як чинників лавиноутворення. На цій основі сформовано набір вхідних геопросторових даних, зокрема цифрову модель рельєфу, супутникові знімки та матеріали землекористування. Далі розраховано й класифіковано основні морфометричні показники рельєфу – абсолютну висоту, крутизну (похил), експозицію та перегини (кривизну) поверхні. Окрему увагу приділено оцінюванню впливу шорсткості підстильної поверхні на стабільність снігового покриву. Отримані факторні карти було інтегровано в єдиний індекс лавинної небезпеки, що дало змогу створити підсумкову карту лавинної небезпеки та виконати кількісну оцінку площ її класів.

Територія дослідження

Боржавський хребет є одним із найбільших і добре відомих гірських масивів Полонинського хребта Українських Карпат. Він розташований в межах Закарпатської

області між долинами річок Віча та Ріка та простягається майже на 50 км у північно-східному напрямку. Орографічна будова масиву визначається довгими, відносно вирівняними гребенями та значними за площею полонинами, що формують характерний для Полонинських Карпат ландшафт середньогір'я. Хребет має переважно згладжений профіль і об'єднує низку вершин, серед яких найвищою є г. Стій (1 681 м), а також Великий Верх (1 598 м), Гимба (1 491 м), Ждимир і Плай. Середня ширина масиву становить 3–4 км, проте в окремих ділянках розширюється до 8–10 км. Для Боржави характерна асиметрія схилів. Північні схили є крутими та місцями скелястими, тоді як південні й південно-західні є пологішими і широко використовуються як гірські луки. Масив складений карпатським флішем з переважанням пісковиків і алевролітів, що зумовлює особливості морфології рельєфу, ґрунтоутворення та схилових процесів (Грицьків та ін., 2016).

Кліматичні умови Боржавського хребта характеризуються помірно холодним гірським кліматом із підвищеною кількістю атмосферних опадів, тривалим сніговим покривом і частими сильними вітрами на гребневих ділянках. До висот близько 1 100–1 200 м поширені букові та ялицево-букові ліси, включно з ділянками пралісів, тоді як вище розташовані типові карпатські полонини, вкриті злаково-різнотравною рослинністю та ягідниками, зокрема чорничниками (Грищенко та ін., 2014). Завдяки відкритим гребеням, панорамним краєвидам і розвиненій мережі туристичних маршрутів Боржава є одним із найпопулярніших рекреаційних районів Закарпаття. Територія активно використовується для пішохідного туризму, парапланеризму, зимових видів спорту та екологічного туризму, а зручна транспортна доступність із прилеглих населених пунктів сприяє організації маршрутів різної складності. Саме через велику кількість туристів вивчення лавинної небезпеки цієї території є надзвичайно актуальним, оскільки йдеться про загрозу життю людей.

Матеріал і методи

Методологічну основу дослідження становить факторно-індексний підхід, розроблений М. Настюком та ін. для оцінювання лавинної небезпеки гірських районів Чернівецької області (Настюк та ін., 2023). Відповідно до цього підходу, лавиноутворення розглядається як результат взаємодії морфометричних параметрів рельєфу, мете-

орологічних умов і властивостей підстильної поверхні, а ризик формалізується через зважені коефіцієнти для кожного класу кожного фактора. На відміну від оригінального дослідження Настюка та ін. (2023) (Настюк та ін., 2023), де використовувався плагін *Semi-Automatic Classification Plugin*, у цій роботі весь аналіз виконано у QGIS 3.x із застосуванням модулів GDAL/Processing і SAGA та растрового калькулятора, що забезпечує відтворюваність методики на основі вільного програмного забезпечення. Крім того, на відміну від Н. З. Грицьківа та ін., які картографували лавинонебезпечні території Карпат у загальних рисах, це дослідження сфокусоване на конкретному масиві Боржави з деталізованим просторовим аналізом і мультиплікативним розрахунком інтегрального індексу небезпеки (Грицьків та ін., 2016).

Обробка вихідних даних виконувалася в середовищі ГІС із застосуванням плагіна *Spatial Analysis Toolbox*, що дозволило автоматизувати розрахунок морфометричних параметрів та забезпечити їх просторову узгодженість (таблиця 1).

Обробка геопросторових даних включала побудову факторних растрових шарів, їх класифікацію та подальше комбінування за допомогою растрового калькулятора (*Raster Calculator*). Такий підхід забезпечує відтворюваність методики та можливість її застосування для інших гірських територій.

Цифрова модель рельєфу була приведена до просторової роздільності 15×15 м шляхом ресемплінгу, що дозволило підвищити деталізацію морфометричного аналізу. Усі геодані були уніфіковані та приведені до однакової просторової роздільності.

Просторова оцінка лавинної небезпеки здійснена шляхом інтегрування окремих факторів у єдиний індекс ризику з використанням геоінформаційних технологій.

Отриманий растр інтегрального індексу лавинної небезпеки було нормалізовано та перекласифіковано на кілька класів ризику за допомогою інструментів *Classify Raster* та *Reclassify by Table*. На основі цього побудовано карту просторового розподілу лавинної небезпеки Боржавського гірського масиву.

Результати

Для визначення потенційної лавинної небезпеки та з'ясування закономірностей накопичення снігу здійснено детальний аналіз морфометричних характеристик рельєфу та характеру підстильної поверхні, що впливають на формування лавин. Розглянемо їх детальніше.

Абсолютна висота місцевості розглядається як інтегральний фактор, що опосередковано відображає температурний режим, тривалість залягання снігового покриву та інтенсивність твердих опадів. Зі збільшенням висоти над рівнем моря, як правило, знижується середньорічна температура повітря, зростає частка твердих опадів і подовжується період залягання снігового покриву, що створює передумови для накопичення значних мас снігу та формування лавинонебезпечних умов. Висотна диференціація також впливає на вітровий режим і перерозподіл снігу, що додатково підсилює просторову неоднорідність лавинного ризику. Висотна диференціація є одним із ключових факторів у факторно-індексних моделях лавинної небезпеки (Настюк та ін., 2023), а збільшення кількості твердих опадів з висотою підтверджено спостереженнями за сніговим покривом у Карпатах (Vyshnevskiy & Donich, 2021).

Для кількісного аналізу використано растрові дані абсолютних висот у межах 200–1 600 м, який було класифіковано на 7 класів з інтервалом 200 м. Такий крок класифікації забезпечує достатню деталізацію вертикальної диференціації рельєфу та узгоджується з гіпсометрич-

Таблиця 1

Вихідні дані, використані для оцінювання лавинної небезпеки

Вид даних	Джерело	Просторова роздільність, формат	Призначення в дослідженні
Супутникові знімки	USGS EarthExplorer	GeoTIFF, TIFF	Візуальний аналіз території, базова просторово-інформаційна основа
Цифрова модель рельєфу (ЦМР)	SRTM/ ASTER GDEM	15 × 15 м (вихідна 30 м), WGS-84	Розрахунок морфометричних показників рельєфу
Дані SRTM	USGS	30 м	Побудова растра абсолютних висот та їх класифікація
Багатоспектральні знімки	Landsat	30 м	Аналіз землекористування та оцінювання шорсткості підстильної поверхні

ними особливостями досліджуваної території. Висотам нижче 600 м, де умови для стійкого накопичення снігу є обмеженими, присвоєно нульовий рівень лавинного ризику. Натомість із підвищенням гіпсометричного рівня коефіцієнт небезпеки поступово зростає, досягаючи максимального значення (3) в інтервалі 1 400–1 600 м, де фіксується найбільша тривалість залягання снігового покриву та інтенсивна акумуляція снігових мас.

За результатами класифікації побудовано три узагальнюючі карти висотного ризику лавиноутворення – високого (рис. 1), середнього (рис. 2) та низького (рис. 3) рівнів. Отримані картографічні моделі відображають просторові закономірності зміни лавинної небезпеки залежно від гіпсометричного положення та слугують базовим шаром для подальшої інтеграції з іншими морфометричними й ландшафтними чинниками.

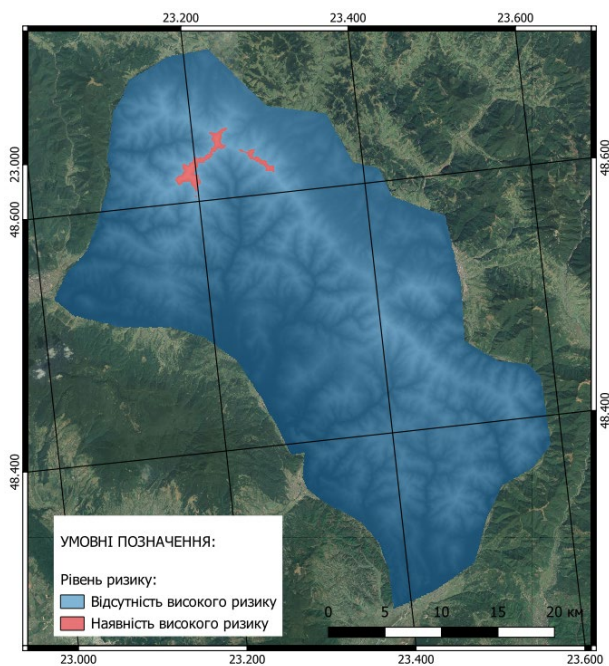


Рис. 1. Ділянки із високим ризиком утворення лавин на території Боржавського масиву

Крутизна схилів є одним із ключових чинників лавиноутворення, оскільки безпосередньо впливає на механічну стійкість снігового покриву та ймовірність його зсуву під дією сили тяжіння. Саме цей морфометричний показник визначає співвідношення між утримувальними силами в товщі снігу та гравітацією, що в комплексі зумовлює ініціацію лавинних процесів. Відомо, що за малих кутів нахилу сніг залишається

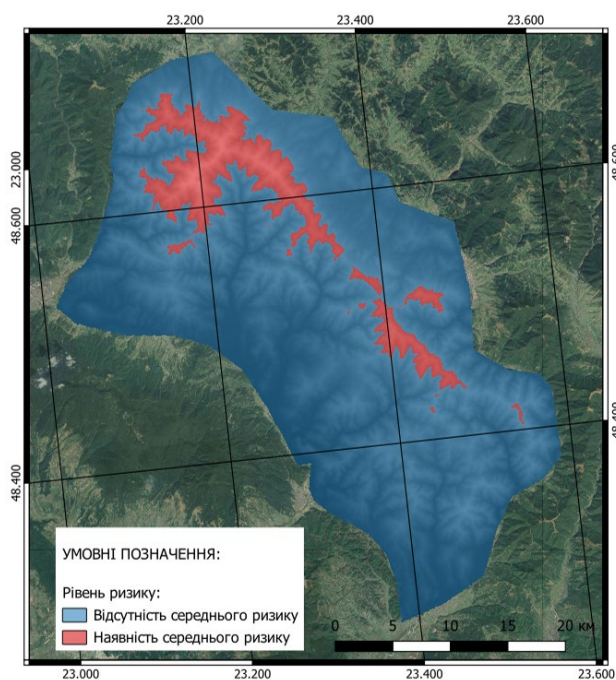


Рис. 2. Ділянки із середнім ризиком утворення лавин на території Боржавського масиву

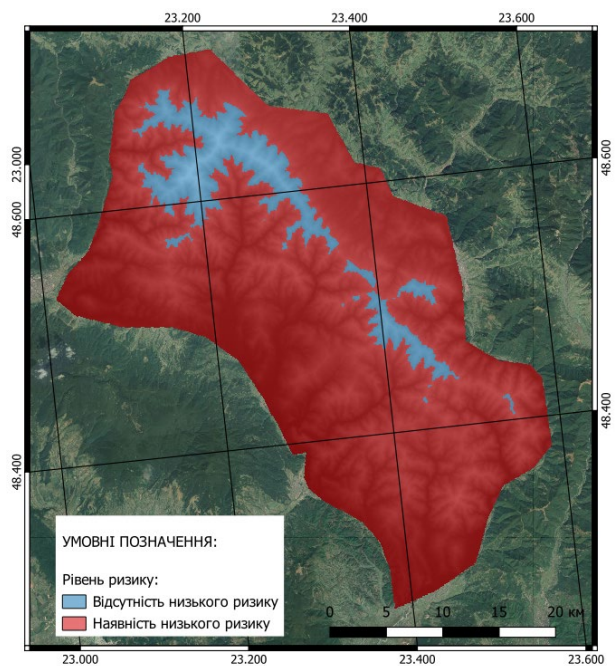


Рис. 3. Ділянки із низьким ризиком утворення лавин на території Боржавського масиву

відносно стабільним, тоді як зі збільшенням крутизни різко зростає ймовірність зриву снігових мас, особливо за наявності «слабких» шарів у товщі снігу (Maggioli & Gruber, 2003; Настюк та ін., 2023).

Для аналізу використано растрові дані похилу в діапазоні 0° – $61,2^{\circ}$, який було класифіковано на 5 класів із кроком 15° . Така градація дала змогу адекватно відобразити зміну лавинної чутливості схилів у межах досліджуваної території та узгодити її із усталеними у лавинознавстві пороговими значеннями. Найбільш лавинонебезпечними визначено схили крутизною 30° – 45° , яким присвоєно максимальний коефіцієнт ризику (3), оскільки саме в цьому інтервалі найчастіше відбувається ініціація снігових лавин через оптимальне поєднання накопичення снігу та дії сили тяжіння.

Помірний рівень небезпеки характерний для схилів крутизною 15° – 30° і 45° – 60° , де умови для сходження лавин є менш сприятливими, але за певних метеорологічних і стратиграфічних умов вони залишаються потенційно небезпечними. Мінімальні значення ризику (1) встановлено для схилів до 15° та понад 60° , що обумовлено відповідно недостатнім гравітаційним навантаженням у першому випадку та обмеженим снігонакопиченням і частими осипами – у другому. Отримана класифікація стала важливою складовою подальшого інтегрального оцінювання лавинної небезпеки території.

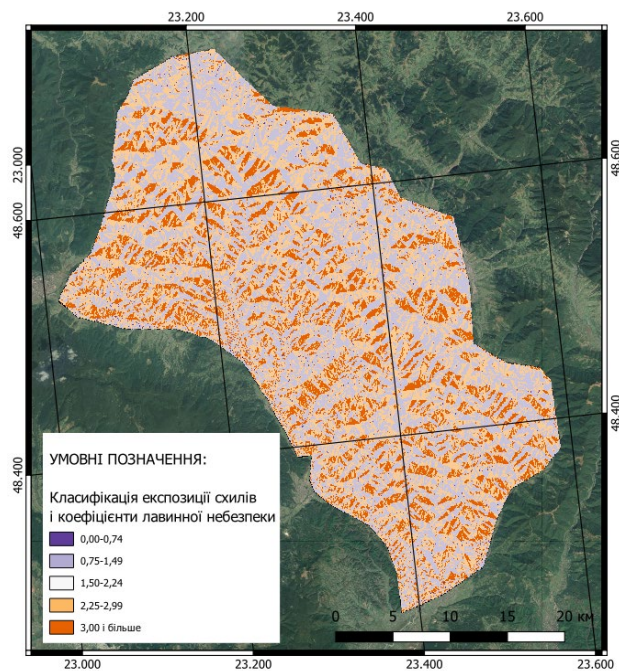


Рис. 4. Класифікація експозиції за коефіцієнтами лавинної небезпеки території Боржавського масиву

Експозиція схилів враховує вплив сонячної радіації, особливості перерозподілу снігу вітром і відмінності в режимі танення сні-

гового покриву (рис. 4). Орієнтація поверхні відносно сторін горизонту визначає енергетичний баланс схилу, ступінь його прогрівання, інтенсивність метаморфізму снігу та умови формування слабких шарів у сніговій товщі. Крім того, експозиція опосередковано відображає вітрову акумуляцію або дефляцію снігу, що є важливим чинником просторової диференціації лавинної небезпеки (Настюк та ін., 2023; Descaulne et al., 2023a).

Для аналізу растр експозиції було класифіковано на 8 румбів і плоскі поверхні, що дало змогу детально відобразити орієнтаційну структуру рельєфу (таблиця 2). Коефіцієнти ризику (від 1 до 3) визначалися з урахуванням переважаючих напрямків вітру, які сприяють перенесенню та накопиченню снігу на підвітряних схилах, а також із урахуванням різної інтенсивності сонячного прогрівання.

Найвищий рівень небезпеки (3 і більше) встановлено для схилів південної експозиції, де частіше формуються нестійкі снігові шари внаслідок активнішого радіаційного прогрівання, повторних циклів підтавання й перемерзання та вітрової акумуляції снігу. Схилам інших експозицій присвоєно нижчі коефіцієнти відповідно до зменшення їхньої лавинної чутливості. Плоскі поверхні віднесені до мінімального рівня ризику через відсутність умов для гравітаційного переміщення снігових мас. Отриманий шар експозиції використано як важливу складову інтегральної моделі лавинної небезпеки.

Перегини (кривизна) схилів в плані та профілі використані для оцінювання локальних умов накопичення або розвантаження снігової маси, оскільки вони відображають дрібні морфологічні особливості поверхні, що впливають на перерозподіл снігу та формування зон напруження у сніговому покриві. Цей показник дає змогу уточнити лавинну чутливість території на рівні дрібних форм рельєфу, які не завжди виявляються за аналізу лише висоти чи крутизни схилів (Biskupic & Barka, 2010; Настюк та ін., 2023). У межах дослідження виділено три типи поверхонь: опуклі, увігнуті та плоскі.

Опуклі форми рельєфу, особливо характерні для пригребневих і вододільних зон, отримали підвищений коефіцієнт ризику (2), оскільки вони пов'язані з формуванням напружених ділянок снігового покриву, активним вітровим перерозподілом і підвищеною ймовірністю ініціації лавинних процесів. Увігнуті та рівні поверхні зага-

Таблиця 2

Класифікація експозиції схилів та коефіцієнти лавинної небезпеки

Експозиція схилу	Діапазон азимутів (°)	Коефіцієнт ризику	Характеристика	Умовне позначення
Плоска поверхня (Flat)	-1	0	Відсутній ухил, снігонакопичення мінімальне	Синій
Північна (North)	337,5–22,5	2	Обмежене сонячне освітлення, можливе тривале збереження снігу	
Північно-східна (NE)	22,5–67,5	1	Помірна інсоляція	
Східна (East)	67,5–112,5	1	Ранкове сонячне освітлення	
Південно-східна (SE)	112,5–157,5	2	Підвищена інсоляція	
Південна (South)	157,5–202,5	3	Максимальне сонячне освітлення, найвищий ризик	Червоний
Південно-західна (SW)	202,5–247,5	2	Інтенсивне післяобіднє прогрівання	
Західна (West)	247,5–292,5	1	Помірна інсоляція	
Північно-західна (NW)	292,5–337,5	1	Обмежене сонячне освітлення	

лом характеризуються відносно стабільнішими умовами та отримали нижчі значення ризику.

Для кривизни в плані (*Plan Curvature*) (рис. 5) застосовано таку класифікацію: значення <0 (увігнута форма) – коефіцієнт ризику 1 (накопичення снігу, зелений колір); $=0$ (плоска поверхня) – коефіцієнт 1; $0 <$ (опукла форма) – коефіцієнт 2 (зони знесення та напруження снігу, червоний колір).

Аналогічний підхід використано для перегинів схилів у профілі (*Profile Curvature*) (рис. 6): значення <0 (увігнута поверхня) – коефіцієнт ризику 1 (зелений); $=0$ (плоска) – коефіцієнт 1; $0 <$ (опукла) – коефіцієнт 2 (червоний). Отримані шари кривизни доповнюють морфометричну характеристику території і підвищують точність інтегрального оцінювання лавинної небезпеки.

Шорсткість підстильної поверхні (*типів земного покриття*) є важливим чинником, що визначає ступінь механічного закріплення снігового покриття та його стійкість до зсуву. Вона відображає характер земного покриття, наявність рослинності, мікронерівностей і скельних виступів, які можуть як стабілізувати сніговий покрив, так і сприяти його перерозподілу. З метою кількісної оцінки шорсткості виконано аналіз типів земного покриття за супутниковими знімками *Landsat*, що дало змогу об'єктивно виділити однорідні типи підстильної поверхні (Настюк та ін., 2023; Gavrila et al., 2022).

Отримані класи було узагальнено і перекласифіковано у чотири категорії лавинної небезпеки відповідно до їх здатності утриму-

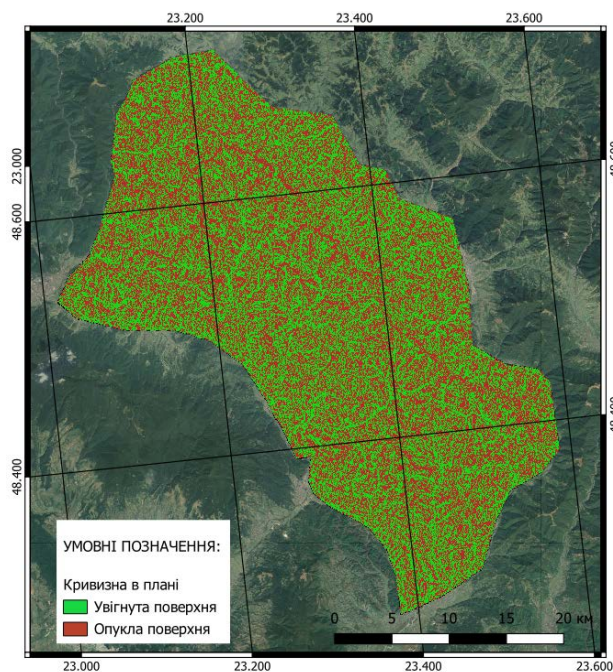


Рис. 5. Перегини (кривизна) схилів у плані на території Боржавського масиву

вати сніговий покрив. Максимальний коефіцієнт ризику (3) присвоєно безлісним територіям – полонинам, пасовищам і скельним ділянкам, де відсутність щільного рослинного покриття зменшує шорсткість і сприяє мобільності снігових мас. Лісові та чагарникові угіддя отримали нижчі значення ризику через їхню стабілізуючу роль.

Інтегральний лавинний ризик (РА) визначався шляхом комбінування окремих факторів у середовищі растровий кальку-

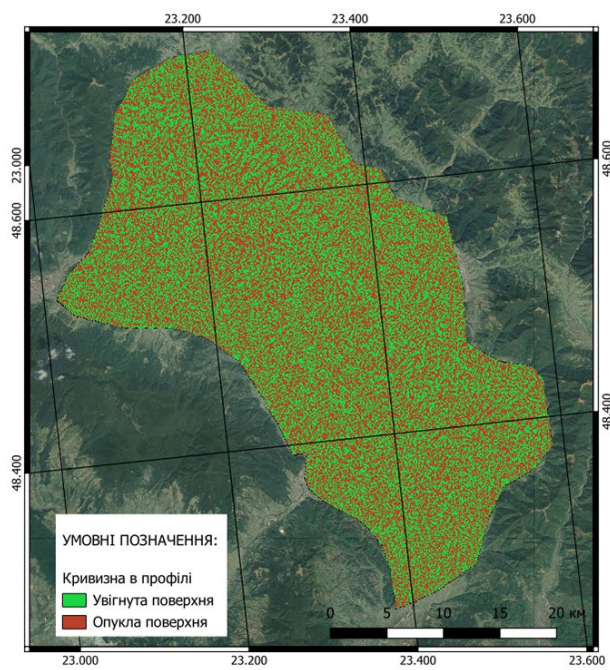


Рис. 6. Перегини (кривизна) схилів у профілі на території Боржавського масиву

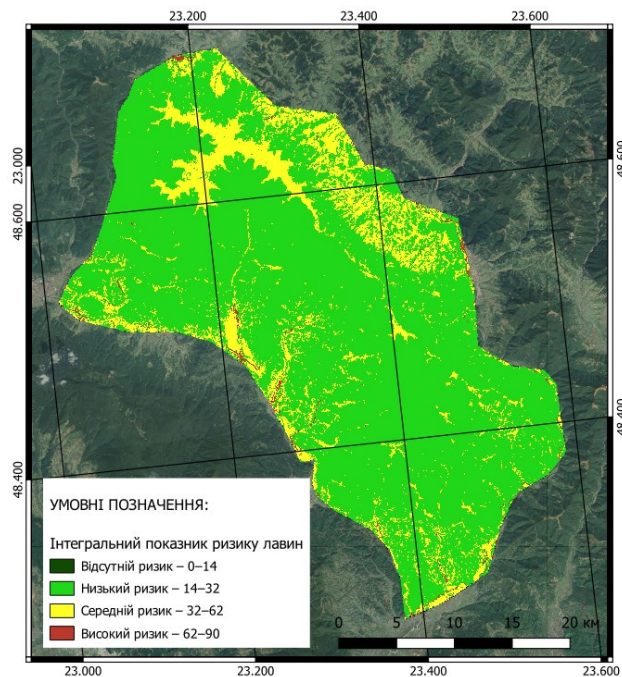


Рис. 7. Інтегральний показник лавинної небезпеки

лятор QGIS за формулою, адаптованою з методики М. Настюка та ін., формула (1) (Настюк та ін., 2023):

$$РЛ = (РВ + РО + РКПЛ) \times РШ \times РП, \quad (1)$$

де РВ – ризик класу небезпеки висоти місцевості; РО – ризик класу небезпеки експозиції схилів; РКПЛ – ризик класу небезпеки кривизни в плані; РШ – ризик класу небезпеки шорсткості поверхні; РП – ризик класу небезпеки похилу схилів.

Запропонована формула дозволяє врахувати домінуючу роль морфометричних параметрів рельєфу, оскільки їх сумарний внесок підсилюється мультіплікативним впливом факторів шорсткості та крутизни, що безпосередньо пов'язані з механізмом сходження лавин.

Отримане растрове зображення інтегрального лавинного ризику було перекласифіковано за допомогою інструментів *Classify Raster* та *Reclassify by Table* на чотири класи відносної лавинної небезпеки (рис. 7). Інтервали класифікації встановлено у такий спосіб: відсутній ризик – 0–14 (зелений колір); низький – 14–32; середній – 32–62; високий – 62–90 (червоний колір). Побудована карта інтегрального ризику відображає просторову диференціацію лавинної небезпеки та може бути використана для подальшого геоінформаційного аналізу й практичних заходів з управління природними ризиками.

На основі розробленої методики просторового аналізу створено підсумкову карту лавинної небезпеки Боржавського гірського масиву (рис. 8). Картографування виконано шляхом інтеграції раніше побудованих факторних карт, які відображають ключові морфометричні та ландшафтні передумови формування снігових лавин у межах середньогірських територій Українських Карпат. До узагальнення залучено показники висоти місцевості, крутизни та експозиції схилів, перегинів (кривизни) поверхні та шорсткості підстильної поверхні, що у сукупності формують просторову структуру лавинної небезпеки.

Об'єднання факторів здійснювалося в середовищі ГС із використанням інструменту *Raster Calculator*, що забезпечило автоматизоване поелементне комбінування вхідних шарів і отримання інтегрального показника лавинної небезпеки для кожної комірки растра. Такий підхід дозволив врахувати як адитивний внесок морфометричних параметрів, так і підсилювальну роль факторів, безпосередньо пов'язаних зі стійкістю снігового покриву.

Отримані значення інтегрального індексу було нормалізовано та перекласифіковано у три класи відносної лавинної небезпеки: 0 – низький рівень, 1 – середній рівень та 2 – високий рівень небезпеки (таблиця 3). Запропонована градація забезпечує наоч-

ність інтерпретації результатів і придатна для практичного використання в задачах просторового планування, природоохоронного менеджменту та моніторингу георизиків. Побудована карта чітко відображає просторову диференціацію лавинного ризику та дає змогу виділити найбільш потенційно небезпечні ділянки Боржавського масиву для подальшого детального аналізу і польової верифікації.

Таблиця 3
Площі класів лавинної небезпеки в межах Боржавського масиву

Клас лавинної небезпеки	Площа, км ²	Частка території, %
Відсутній	220	61
Низький	85	24
Середній	40	11
Високий	15	4

Карта рівня лавинної небезпеки демонструє чітко виражений просторовий зв'язок між підвищеними значеннями ризику та морфометричними особливостями рельєфу. Найвищі рівні лавинної небезпеки притаманні ділянкам із значними абсолютними висотами, підвищеною крутизною схилів, переважно південною експозицією та низькою шорсткістю підстильної поверхні. Таке поєднання чинників створює найсприятливіші умови для накопичення нестійких снігових мас і їх подальшого гравітаційного переміщення. Просторово ці зони тяжіють до пригребневих ділянок і відкритих полонин Боржавського масиву, де активно проявляються процеси вітрового перерозподілу снігу та формування потенційно нестійких шарів. Виявлені просторові паттерни узгоджуються з результатами досліджень для суміжних масивів Карпат (Rudyi et al., 2020; Настюк та ін., 2023).

Ділянки з відсутнім або низьким рівнем лавинної небезпеки домінують у нижніх частинах схилів, на пологих формах рельєфу і в межах лісових масивів. Тут, завдяки меншій крутизні, вищій шорсткості підстильної поверхні та стабілізувальній ролі деревної рослинності забезпечується більша стійкість снігового покриву і, відповідно, нижча ймовірність сходження лавин. Виявлені просторові закономірності загалом узгоджуються з сучасними уявленнями про морфометричну зумовленість лавинних процесів у середньогір'ї Українських Карпат і підтверджують коректність застосованої методики ГІС-моделювання. Стабілізуючу

роль лісового покриву як чинника зниження лавинного ризику підтверджено і для Роднянських гір (Gavrila et al., 2022).

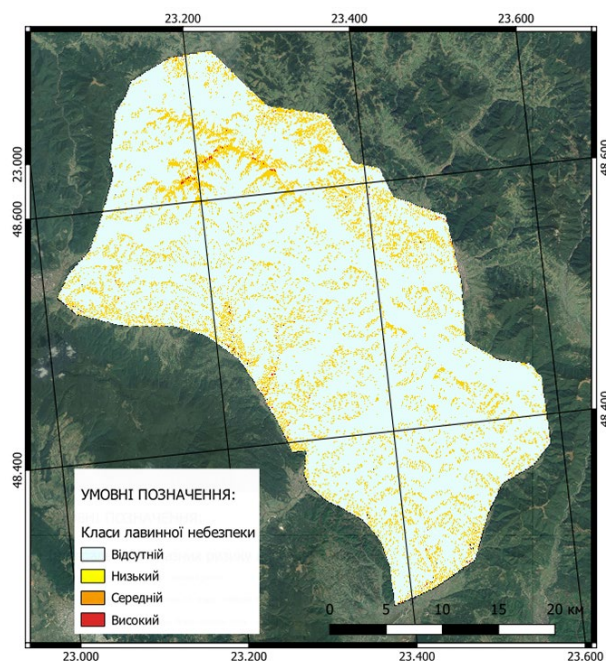


Рис. 8. Рівень лавинної небезпеки Боржавського гірського масиву

Обговорення

Геопросторова оцінка лавинної небезпеки регіону підтверджує домінування безпечних і малонебезпечних територій, тоді як ділянки з високим ризиком займають незначну частку масиву. За результатами розрахунків, площа територій з високою лавинною небезпекою становить 15 км², що відповідає 4 % загальної площі масиву Боржава.

Просторовий аналіз розподілу небезпечних ділянок засвідчив їхню концентрацію у високогірній частині хребта на висотах понад 1 400 м, де у рельєфі поєднуються значна крутизна схилів і відкриті форми поверхні. Схили з крутизною 30–45° виявилися найбільш лавиноактивними, оскільки набуває нестійкого стану під дією сили тяжіння та механічного перевантаження. Аналогічні висотні та морфометричні закономірності встановлено для Чорногірського масиву (Decaulne et al., 2023a), де лавинна активність також зосереджена у пригребневих зонах із відкритими схилами. Порівняння результатів підтверджує, що виявлені просторові паттерни є типовими для Східних Карпат загалом.

Для схилів південної експозиції підвищена лавинна небезпека пов'язана з інтенсивнішим прогріванням, що спричиняє утворення у сніговій товщі нестійких талих прошарків. До того ж опуклі форми, типові для пригребневих зон, сприяють накопиченню надлишкових об'ємів снігу та запуску сходжень лавин. Ці закономірності узгоджуються з результатами дендрохронологічних досліджень у Роднянських горах, де І. Г. Гаврила та ін. показали, що більшість задокументованих лавинних подій пов'язана з адвекційними відлигами після інтенсивних снігонакопичень (Gavrila et al., 2022). Такий сценарій характерний і для відкритих схилів південних експозицій Боржавського хребта. А. Декольн та ін. додатково підтвердили, що синоптичні типи із зональним перенесенням є тригерами найпотужніших лавинних подій у Чорногорі, що є суміжним масивом Українських Карпат (Desaulne et al., 2023b).

Важливим елементом зниження лавинного ризику є збереження та відновлення лісового покриву, який виконує функцію природного стабілізатора рельєфу, зменшуючи швидкість вітру та інтенсивність перерозподілу снігу. Перспективним напрямом є створення системи раннього попередження на основі інтеграції геоморфологічних, метеорологічних і сніголавинних спостережень у ГІС-середовищі. Доповнення таких заходів інформаційно-просвітницькою роботою і відповідною підготовкою рятувальних служб сприятиме підвищенню загального рівня безпеки та формуванню збалансованої системи природокористування в межах Боржавського гірського масиву.

Висновки

У результаті проведеного дослідження виконано комплексну оцінку лавинної небезпеки Боржавського гірського масиву з використанням методів геоінформаційного аналізу та даних дистанційного зон-

дування Землі. Методика ґрунтується на поєднанні ключових морфометричних параметрів рельєфу (абсолютної висоти, крутизни, експозиції та перегинів схилів) із характеристиками шорсткості підстильної поверхні, що дозволило відобразити просторову диференціацію лавинного ризику.

Встановлено, що найбільш лавинонебезпечні ділянки приурочені до пригребневих зон Боржавського хребта на висотах понад 1 400 м, де поєднуються круті схили (30–45°), південної експозиції та відсутністю лісового покриву. Саме такі умови сприяють формуванню нестійких снігових нашарувань і підвищеному ризику сходження лавин. Території з низьким або відсутнім рівнем лавинної небезпеки переважають у нижніх частинах схилів і в межах лісистих ділянок, що зумовлено тут вищою стабільністю снігового покриву.

Встановлено, що зони високої лавинної небезпеки займають приблизно 15 км², або 4 % площі масиву, тоді як безпечні та мало-небезпечні території становлять понад 80 %. Геопросторові результати підтверджують доцільність використання ГІС-моделювання для попереднього лавинного районування середньогірських територій Українських Карпат.

Отримані результати можуть бути використані для розроблення практичних рекомендацій щодо раціонального та безпечного використання території масиву Боржава. Передусім доцільним є обмеження будівництва та розміщення стаціонарних туристичних, транспортних і інженерних об'єктів в зонах середньої та високої лавинної небезпеки. В умовах активної рекреаційної експлуатації масиву, особливо у зимовий період, необхідним є коригування туристичних маршрутів і обмеження доступу до небезпечних ділянок у періоди нестійкого стану снігового покриву.

Список використаної літератури

- Біланюк В., Тиханович Є. Лавинні процеси в Українських Карпатах. *Journal of Education, Health and Sport*. 2015. Vol. 5, no. 7. P. 96–104. <http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.19307>
- Грицьків Н. З., Лайкун А. Ю., Бабій А. В. Картографування лавинонебезпечних територій з використанням ГІС-технологій. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. 2016. Вип. 84. С. 44–55. <https://doi.org/10.23939/istcgscap2016.02.044>
- Грищенко В. Ф., Михайлов В. А., Рудий Р. М., Стадниченко С. М., Яковлев Є. О. Кадастр снігових лавин України. Київ : Укр. гідрометеорол. ін-т, 2014. 238 с.
- Настюк М., Косован В., Катринін О. Побудова карт ризиків лавинної небезпеки за допомогою ArcGIS на основі геоморфологічного аналізу для гірських районів Чернівецької області. *Науковий вісник Чернівецького університету : Географія*. 2023. Вип. 845. С. 101–109. <https://doi.org/10.31861/geo.2023.845.101-109>

Biskupic M., Barka I. Spatial modelling of snow avalanche runouts using GIS. *Proceedings of the 22nd Congress of the Czech Geographical Society*. Ostrava, 2010. P. 8–19.

Covăsnianu A., Grigoras I. R., State L. I., Balin D., Hogas S., Balin I. Mapping snow avalanche risk using GIS technique and 3D modeling: Case study Ceahlău National Park. *Romanian Journal of Physics*. 2011. Vol. 56, nos. 3–4. P. 476–483. <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.1884082>

Decaulne A., Bhattarai S., Saemundsson P., Croke J. Snow-avalanche frequency in the Chornohora Mountains (Ukrainian Carpathians) – A multi-century perspective from tree rings and historical data. *Catena*. 2023a. Vol. 232. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107388>

Decaulne A., Rachita I., Kholiavchuk D., Pop O., Holobaca I. H., Ridush O., Ridush B., Horvath C. Patterns of snow avalanche activity during the last century in Chornohora Range (Eastern Carpathians, Ukraine): tree-ring reconstruction coupled with synoptic conditions analysis. *Catena*. 2023b. Vol. 233. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107523>

Gavrila I. G., Kholiavchuk D., Holobaca I. H., Ridush O., Horvath C., Ridush B., Pop O. T. Tree-ring records of snow-avalanche activity in the Rodna Mountains (Eastern Carpathians, Romania). *Natural Hazards*. 2022. Vol. 114, no. 2. P. 2041–2057. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05458-w>

Jamieson B., Stethem C. Snow avalanche hazard and management in Canada: challenges and progress. *Natural Hazards*. 2002. Vol. 26. P. 35–53. <https://doi.org/10.1023/A:1015212626232>

Karabiniuk M., Hostiuk Z., Burianyk O., Leta V., Terletska Ya. Mapping and geoinformation analysis of snow avalanche processes in geocomplexes of the subalpine and alpine highlands of the Chornohora (Ukrainian Carpathians). *International Conference of Young Professionals GeoTerrace-2022*. Lviv, 2022. P. 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022590019>

Maggioni M., Gruber U. The influence of topographic parameters on avalanche release dimension and frequency. *Cold Regions Science and Technology*. 2003. Vol. 37, no. 3. P. 407–419. [https://doi.org/10.1016/S0165-232X\(03\)00080-6](https://doi.org/10.1016/S0165-232X(03)00080-6)

McClung D., Schaerer P. *The Avalanche Handbook*. Seattle : The Mountaineers, 1993. 342 p.

Rudyi R. M., Kyselov Yu. O., Domashenko H. T., Kravets O. Ya., Husar K. D. Analysis of mountain relief for the causes of snow avalanches. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*. 2020. Vol. 29, no. 4. P. 789–795. <https://doi.org/10.15421/112071>

Vyshnevskiy V. I., Donich O. A. Snow cover in the Ukrainian Carpathians. *Acta Hydrologica Slovaca*. 2021. Vol. 22, no. 2. P. 284–293. <https://doi.org/10.31577/ahs-2021-0022.02.0032>

References

Bilaniuk, V., & Tikhanovich, I. (2015). Lavynni protsesy v Ukrainykykh Karpatakh [Avalanche processes in the Ukrainian Carpathians]. *Journal of Education, Health and Sport*, 5(7), 96–104. <http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.19307> [in Ukrainian]

Hrytskiv, N. Z., Laikun, L. Yu., & Babii, L. V. (2016). Kartohrafuvannia lavinnonebezpechnykh terytorii z vykorystanniam HIS-tekhnologii [Mapping avalanche-prone areas using GIS technologies]. *Suchasni dosiahnennia heodezychnoi nauky ta vyrobnytstva, [Modern achievements of geodetic science and production]*, (84), 44–55. <https://doi.org/10.23939/istcgcap2016.02.044> [in Ukrainian]

Hryshchenko, V. F., Mykhailov, V. A., Rudyi, R. M., Stadnychenko, S. M., & Yakovlev, Ye. O. (2014). Kadastr snihovykh lavyn Ukrainy [Cadastre of snow avalanches of Ukraine]. *Ukrainskyi hidrometeorologichnyi instytut*. [in Ukrainian]

Nastiuk, M., Kosovan, V., & Katrynin, O. (2023). Pobudova kart ryzykiv lavynnoi nebezpeky za dopomohoiu ArcGIS na osnovi heomorfolohichnoho analizu dlia hirskykh raioniv Chernivetskoi oblasti [Mapping avalanche risk using ArcGIS based on geomorphological analysis for mountainous areas of Chernivtsi region]. *Naukovyi visnyk Chernivetskoho universytetu : Heohrafiia, [Scientific Herald of Chernivtsi University : Geography]*, (845), 101–109. <https://doi.org/10.31861/geo.2023.845.101-109> [in Ukrainian]

Biskupic, M., & Barka, I. (2010). Spatial modelling of snow avalanche runouts using GIS. In *Proceedings of the 22nd Congress of the Czech Geographical Society* (pp. 8–19). Ostrava. [in English]

Covăsnianu, A., Grigoras, I. R., State, L. I., Balin, D., Hogas, S., Balin, I. (2011). Mapping snow avalanche risk using GIS technique and 3D modeling: Case study Ceahlău National Park. *Romanian Journal of Physics*, 56(3–4), 476–483. <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.1884082> [in English]

Decaulne, A., Bhattarai, S., Saemundsson, P., & Croke, J. (2023a). Snow-avalanche frequency in the Chornohora Mountains (Ukrainian Carpathians) – A multi-century perspective from tree rings and historical data. *Catena*, (232), 107388. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107388> [in English]

Decaulne, A., Răchită, I., Kholiavchuk, D., Pop, O., Holobăcă, I. H., Ridush, O., Ridush, B., & Horváth, C. (2023b). Patterns of snow avalanche activity during the last century in Chornohora Range (Eastern Carpathians, Ukraine): Tree-ring reconstruction coupled with synoptic conditions analysis. *Catena*, (233), 107523. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107523> [in English]

Gavrilă, I. G., Kholiavchuk, D., Holobăcă, I. H., Ridush, O., Horváth, C., Ridush, B., & Pop, O. T. (2022). Tree-ring records of snow-avalanche activity in the Rodna Mountains (Eastern Carpathians, Romania). *Natural Hazards*, 114(2), 2041–2057. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05458-w> [in English]

Jamieson, B., & Stethem, C. (2002). Snow avalanche hazard and management in Canada: Challenges and progress. *Natural Hazards*, (26), 35–53. <https://doi.org/10.1023/A:1015212626232> [in English]

Karabiniuk, M., Hostiuk, Z., Burianyk, O., Leta, V., & Terletska, Ya. (2022). Mapping and geoinformation analysis of snow avalanche processes in geocomplexes of the subalpine and alpine highlands of the Chornohora (Ukrainian Carpathians). In *International Conference of Young Professionals GeoTerrace-2022* (pp. 1–5). <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022590019> [in English]

Maggioni, M., & Gruber, U. (2003). The influence of topographic parameters on avalanche release dimension and frequency. *Cold Regions Science and Technology*, 37(3), 407–419. [https://doi.org/10.1016/S0165-232X\(03\)00080-6](https://doi.org/10.1016/S0165-232X(03)00080-6) [in English]

McClung, D., & Schaerer, P. (1993). *The Avalanche Handbook*. The Mountaineers. [in English]

Rudyi, R. M., Kyselov, Yu. O., Domashenko, H. T., Kravets, O. Ya., & Husar, K. D. (2020). Analysis of mountain relief for the causes of snow avalanches. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 29(4), 789–795. <https://doi.org/10.15421/112071> [in English]

Vyshnevskiy, V. I., & Donich, O. A. (2021). Snow cover in the Ukrainian Carpathians. *Acta Hydrologica Slovaca*, 22(2), 284–293. <https://doi.org/10.31577/ahs-2021-0022.02.0032> [in English]

Дата першого надходження статті до видання: 09.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 22.05.2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)